

様 式 C - 1 9、F - 1 9 - 1、Z - 1 9 （共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 5 年 5 月 2 5 日現在

機関番号：3 7 1 1 1

研究種目：若手研究

研究期間：2019 ~ 2022

課題番号：1 9 K 2 0 5 1 1

研究課題名（和文）マイクロデータに基づく中国の石炭火力発電事業所の効率性分析と二酸化炭素排出評価

研究課題名（英文）Evaluating power generation efficiency and CO2 reduction potential of coal-fired thermal power plants in China based on microdata

研究代表者

江口 昌伍（Eguchi, Shogo）

福岡大学・経済学部・准教授

研究者番号：0 0 8 2 3 9 7 3

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中国の石炭火力発電所レベルでの発電データにメタフロンティアDEAを用いた分析フレームワークを適用し、発電効率性の評価と非効率性の要因を分析した。具体的には、発電所の規模や立地する地域の違い、発電所を運営する発電会社間でどれだけの発電効率性の差異が存在しているかを定量化することに成功した。また、発電所ごとのCO2やPM2.5などの環境負荷物質の排出データを考慮し、各発電会社がどの環境負荷物質の削減に注力すべきかも明らかにした。加えて、先述のDEAフレームワークにLMDI法を組み合わせることで、効率性の経年変化がマスペースのCO2排出量の変化にどれだけ影響を与えているかを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により明らかになった中国の石炭火力発電所の非効率性の要因を基に、世界最大のCO2排出国である中国が今後カーボンニュートラルを推し進めるにあたって、どのようなプランで火力発電所をスクラップしていくべきかという道筋を提案することができた。加えて、発電会社間での積極的な技術面や暗黙知の共有が発電効率性の改善には不可欠であることも示された。また、本研究の学術的な意義としては、既存のDEAフレームワークを多層型のメタフロンティア構造に拡張することによって、分析目的に応じた非効率性が見える化が可能な分析フレームワークを提案したことにある。

研究成果の概要（英文）：In this study, an analytical framework using meta-frontier DEA was applied to power generation data at the coal-fired power plant level in China to evaluate power generation efficiency and analyze sources of inefficiency. Specifically, the study succeeded in quantifying how much disparity in power generation efficiency exist between different power plant sizes, different regions in which they are located, and different power generation companies that operate the plants. In addition, considering the emission data of environmentally hazardous substances such as CO2 and PM2.5 for each power plant, the study also clarified which environmentally hazardous substances each power generation company should focus on reducing. In addition, by combining the LMDI method with the DEA framework described above, this study was able to quantify the the impact of changes in efficiency over time on changes in mass-based CO2 emissions.

研究分野：環境経済学

キーワード：データ包絡分析法 中国 石炭火力発電所 カーボンニュートラル 地域間格差

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

2015 年にパリで開催された第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において、京都議定書以来 18 年ぶりの地球温暖化問題緩和に向けての国際的な枠組みとして、パリ協定が採択された。産業革命以来、世界の CO₂ 排出量は一貫して上昇傾向にあり、2015 年における化石燃料起源の CO₂ 排出量は世界全体で約 323 億トンと推計されているが、国別にみると中国が約 92 億トンの CO₂ を排出しており、世界最大の排出国である。その大きな要因として、中国国内の電源構成比の約 8 割は火力発電であるが、中国は世界最大の石炭産出国であり、火力発電に用いられる燃料の 70% 以上を石炭が占めていることが挙げられる。

CO₂ 排出量削減に向けて、中国はパリ協定において 2005 年比で GDP 当たり CO₂ 排出量を 2030 年までに 60～65% 削減するという目標を掲げただけでなく、『第 13 次 5 ヶ年計画』においても CO₂ 排出量削減を目指しているが、今後増加すると予想されるエネルギー需要に対応するために、石炭火力による発電量を維持していくことを明言している。中国政府がこれらの地球温暖化緩和に向けての環境政策を執り行う上で、国内の火力発電所の詳細な発電効率性を把握することが決定的に重要である。しかしながら、既存研究では、中国国内の省単位の発電・エネルギー効率性の分析を行っている研究は数多く存在するものの、火力発電所を単位とした効率性分析は、データの入手の困難さからほとんど行われていない。

2. 研究の目的

本研究では、中国国内の石炭火力発電所の詳細なデータを利用し、データ包絡分析法（Data Envelopment Analysis: DEA）を用いて、中国国内における石炭火力発電所の効率性を分析するための DEA フレームワークを提案し、発電効率の改善がパリ協定などの環境政策目標の達成にどの程度貢献し得るかを定量的に評価する。研究課題の核心をなす学術的「問い」は以下の通りである。

- ・ 中国国内の発電所の効率性にはどの程度格差が存在するか？地域間格差は存在するか？
- ・ 発電効率性の改善、つまり技術の進歩が温暖化の緩和にどの程度貢献し得るか？
- ・ 技術進歩の過去のトレンドは？今後どの程度の技術進歩が必要なのか？

3. 研究の方法

本研究では、メタフロンティア DEA を用いて中国の石炭火力発電所の発電効率性の評価と、技術格差の定量化を行った。DEA はノンパラメトリックな分析手法であり、生産関数型を仮定せずに、複数の投入・産出項目を考慮しながら分析対象の decision making unit (DMU) とフロンティアラインとの相対距離によって、効率性を評価することができる。従来型の DEA は単一のフロンティアを基準に DMU の効率性を測定していたが、メタフロンティア DEA では、地域や企業群などのサブグループごとにグループフロンティアを設定し、分析対象となる全 DMU から成るフロンティア（メタフロンティア）と各グループフロンティア間の距離を計測することで、各グループ間に存在する技術格差を定量化することができる。

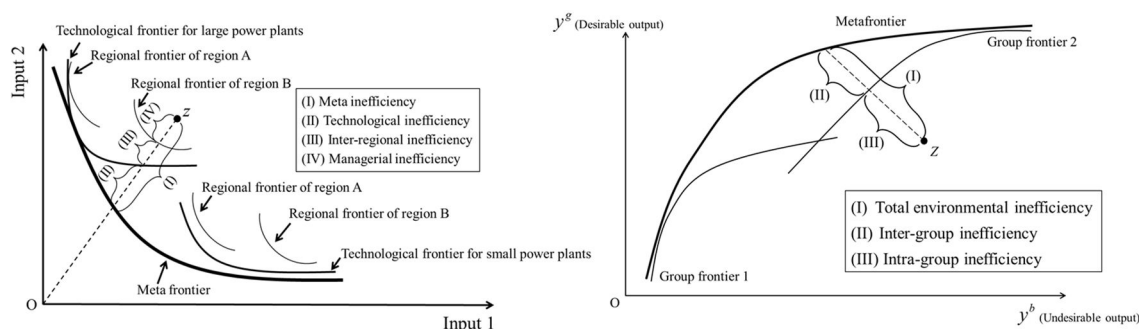


図 1. 研究で用いたメタフロンティア DEA のイメージ図

図 1 の左図は次節の研究成果 1 で、右図は研究成果 2 で考慮したメタフロンティア DEA のイメージ図である。研究成果 1 では、グループフロンティアとして、「発電所の規模に応じたフロンティア」と「発電所の立地する地域に応じたフロンティア」を考慮している。従って、当該 DEA フレームワークでは、発電所の規模と立地する地域の違いが生む発電効率性の格差を定量化することができる。一方、研究成果 2 では、「発電企業ごとに特有なフロンティア」をグループフロンティアとして考慮しており、発電効率性の格差の要因を、「発電企業間での技術格差」と「同一企業内でのマネジメント面の格差」に分解することができる。

4. 研究成果

研究成果

本研究では、上述のメタフロンティア DEA フレームワークを用いて、中国の石炭火力発電所の非効率性の要因を、発電所の規模の違いによる非効率性である Technological inefficiency、同程度の規模の発電所のグループ内における地域間の技術の差による非効率性である Inter-regional inefficiency、発電所が立地する同地域内におけるマネジメントの差による非効率性である Managerial inefficiency に分解した。本研究では、中国全土を東部、中部、西部の3つのグループに分け、発電所の規模を大規模・中規模・小規模の3つに区分した。発電効率性を評価するための投入要素として発電所ごとの石炭消費量と資本量、産出要素としてネットの電力生産量を考慮した。

図2は、2011年における規模別・地域別の各非効率性の平均値を積み上げ棒グラフとして表したものである。図2より、小規模な発電所の Meta inefficiency が大・中規模発電所に比べて高く、特に、中部地域に大きな非効率性が存在しており、その大部分は Managerial inefficiency が占めていることが分かる。一方で、大規模発電所に関しては西部地域に最も大きな非効率性が存在し、その主な要因は Inter-regional inefficiency である。

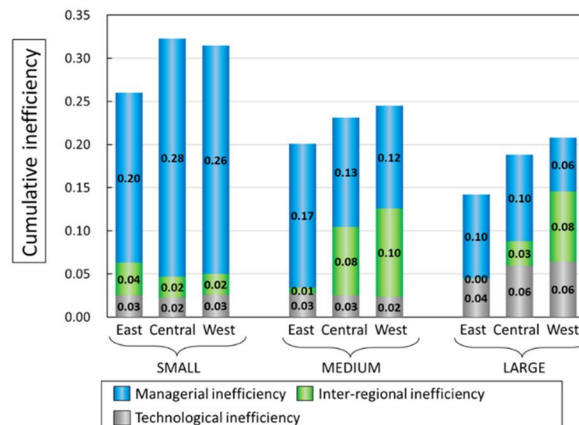


図2. 規模別・地域別の各非効率性の平均値

加えて、本研究ではメタフロンティア DEA によって定量化された非効率性の要因を基に、中国の石炭火力発電所の将来的なスクラップ政策についても議論を行った。図3は中国西部に立地する大規模な石炭火力発電所の非効率性の大きさと、その要因を表したものである。具体的には、図中の円の大きさが非効率性の大きさを表し、横軸が非効率性に占める Managerial inefficiency、縦軸は Technological inefficiency の比率をそれぞれ表しており、原点に近づくほど Inter-regional inefficiency の比率が大きくなる。図3では赤く塗られたエリアは Technological inefficiency の割合が高く、この非効率性の改善には発電所の規模を変更する必要がありハードルが高い。緑色のエリアでは、Managerial inefficiency の割合が高く、マネジメント面の改善での非効率性改善の余地が多く、非効率性改善のハードルは比較的低いと考えられる。最後に、黄色のエリアでは、Inter-regional inefficiency の割合が高く、非効率性の改善には他の地域で導入されているような最先端の設備の導入や質の良い石炭を用いる必要があり、非効率性改善のハードルは中程度と考えられる。従って、図3に示された非効率性の大きさとその要因を総合的に判断することで、中国が今後カーボンニュートラルを進めていく上で、優先的にスクラップすべき石炭火力発電を特定することができる。本研究成果は、査読付き英文誌である

Renewable and Sustainable Energy Reviews 誌に掲載されている [1]。

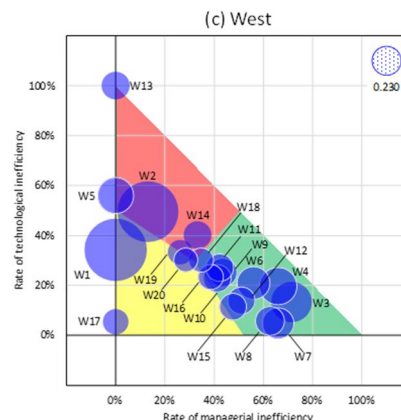


図3. 中国西部に立地する大規模石炭火力発電所の非効率性の内訳

研究成果

本研究では、図 1 の右図で示されたメタフロンティア DEA フレームワークを用いて、発電効率性の格差の要因を、「発電企業間での技術格差 (Inter-group inefficiency)」と「同一企業内でのマネジメント面の格差 (Intra-group inefficiency)」に分解した。本研究では発電効率性を評価するにあたって、研究成果と同様の投入要素と望ましい産出要素に加え、望ましくない産出 (undesirable output) として CO₂、SO₂、NO_x、PM_{2.5} を考慮した。図 4 は、中国の 5 大発電所が有する石炭火力発電所レベルでの、undesirable output ごとの効率性スコアをヒートマップ図として表したものである。セル内の色が濃いほど、非効率性が大きいことを表している。

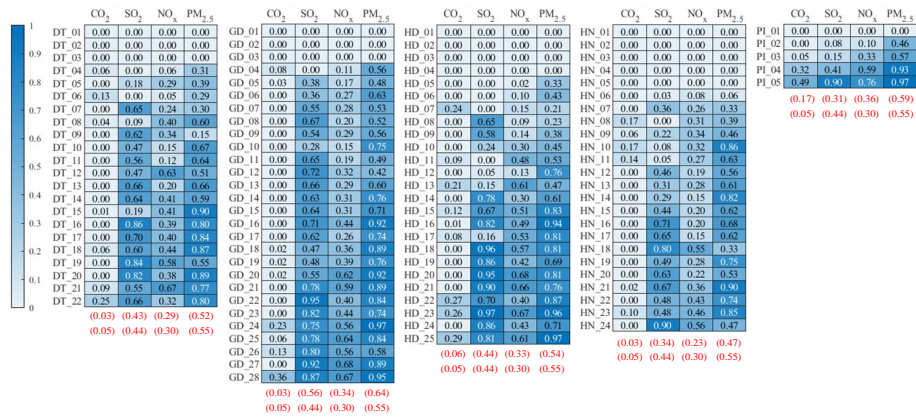


図 4. 望ましくない産出要素ごとの効率性スコア

図 5 は、発電所ごとの Inter-group inefficiency 及び Intra-group inefficiency の積み上げ棒グラフである。この結果から、発電所の環境非効率性のソースにおいて Intra-group inefficiency の占める割合が、Inter-group inefficiency の占める割合に比べて圧倒的に大きいことがわかる。実際に、Total inefficiency スコアが 0 を超える環境非効率な計 88 基の発電所の中で、その非効率性のソースの半分以上を Intra-group inefficiency が占める発電所は 71 基存在する。したがって、同一企業グループ内の技術格差を埋めるように努めることは、中国国内のほとんどの発電所の環境非効率性の改善に向けて、重要なことであると言える。一方で、非効率性のソースの半分以上を Inter-group inefficiency が占める発電所も 17 基存在する。したがって、これらの発電所に対しては、企業グループ間の垣根を越えた技術の伝播が必要であると言える。

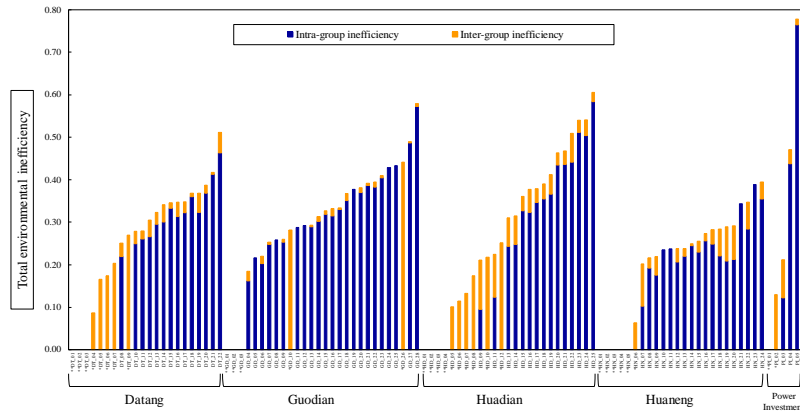


図 5. 各発電所の非効率性の内訳

本研究で提案したメタフロンティア分解フレームワークは、発電所に存在する環境非効率性を定量的に分解し、非効率性を改善する方策を、企業内での知識共有 (knowledge share) と、企業間での技術伝播 (technology spillover) という観点から議論できる点で有用である。本研究成果は、査読付き英文誌である *Energy Economics* 誌に掲載されている [2]。

研究成果

本研究では、メタフロンティア DEA と LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index) を組み合わせた CO₂ 削減ポテンシャルの要因分解分析フレームワークを開発した。表 1 は、中国 4 地域における CO₂ 排出削減ポテンシャルの変化を表している。ここでの CO₂ 排出削減ポテンシャルとは、各発電所の非効率性値に実際の石炭消費量と石炭消費量あたりの CO₂ 排出原単位を乗じたものである。

(Unit: Thousand ton)		2009	2011	Increasing rate	Sample size
SM	East	2025.3	2361.6	16.6%	63
	Central	5361.1	5394.9	0.6%	73
	West	3468.2	4587.1	32.3%	49
	Northeast	832.6	1042.6	25.2%	19
	Total	11687.3	13386.2	14.5%	204
Large	East	10832.6	11036.8	1.9%	87
	Central	10904.9	12551.6	15.1%	70
	West	3583.5	4763.44	32.9%	24
	Northeast	1648.12	1912.38	16.0%	13
	Total	26969.1	30264.2	12.2%	194

表 1. 各地域における CO₂ 排出削減可能ポテンシャルの変化

次に、これらの CO₂ 排出削減ポテンシャルの変化の要因を LMDI 要因分解法によって明らかにする。図 6 は、LMDI によって得られた、SM (Small and Medium)・Large グループにおける各地域の発電所 1 カ所当たりの EFF (効率性変化の影響) と SCALE (電力生産規模の変化の影響) の平均値を表したものである。図 7 (a) より、SM グループにおいては、中部以外の地域では、EFF が CO₂ 排出削減ポテンシャルを増加させる方向に寄与しており、特に西部と北東部地域での正の効果が大きい。つまり、中部以外の地域では、2009 年から 11 年にかけての相対的な発電の非効率性の増加が CO₂ 排出削減ポテンシャルを増加の要因となっている。

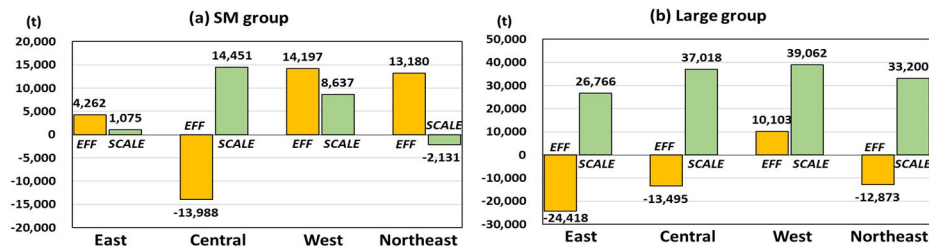


図 6. 各地域における EFF と SCALE の発電所 1 カ所あたりの平均値の比較

最後に、図 6 の EFF の結果を TECH、INTER、MANAGE (これらは研究成果の各項と同意) へとブレイクダウンする。図 7 は、Large グループにおける各地域の TECH、INTER、MANAGE の発電所 1 カ所当たりの平均値である。

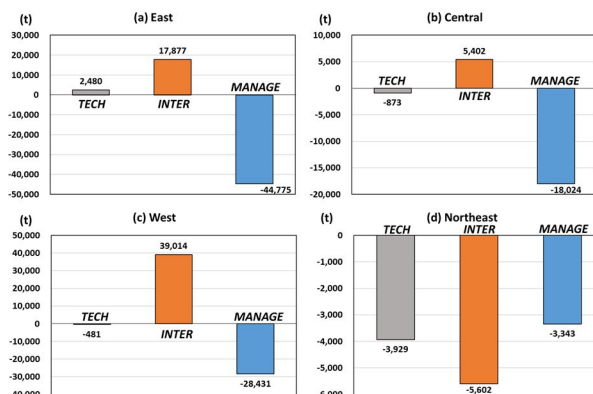


図 7. Large グループにおける TECH、INTER、MANAGE の発電所 1 カ所当たりの平均値

このように、メタフロンティア DEA と LMDI を組み合わせることで、メタフロンティア DEA における各項の分析期間中の変化が CO₂ 排出量にどの程度影響を与えているかを定量化することができる。本研究成果は査読付き英文誌である *Energies* 誌に掲載されている [3]。

参考文献

- [1] Shogo Eguchi, Hirotaka Takayabu, Chen Lin. 2021. “Sources of inefficient power generation by coal-fired thermal power plants in China: A metafrontier DEA decomposition approach”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138, 110562.
- [2] Tomoaki Nakaishi, Hirotaka Takayabu, Shogo Eguchi. 2021. “Environmental efficiency analysis of China's coal-fired power plants considering heterogeneity in power generation company groups”, *Energy Economics* 102, 105511.
- [3] Shogo Eguchi. 2022. “CO₂ Reduction Potential from Efficiency Improvements in China's Coal-Fired Thermal Power Generation: A Combined Approach of Metafrontier DEA and LMDI”, *Energies* 15, 2430.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tomoaki Nakaishi, Hirotsu Takayabu, Shogo Eguchi	4. 巻 102
2. 論文標題 Environmental efficiency analysis of China's coal-fired power plants considering heterogeneity in power generation company groups	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy Economics	6. 最初と最後の頁 105511
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eneco.2021.105511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 江口 昌伍	4. 巻 66
2. 論文標題 メタフロンティアDEAモデルの政策への応用 中国の石炭火力発電所を例に	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 オペレーションズ・リサーチ	6. 最初と最後の頁 739 - 747
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shogo Eguchi	4. 巻 15
2. 論文標題 CO2 Reduction Potential from Efficiency Improvements in China's Coal-Fired Thermal Power Generation: A Combined Approach of Metafrontier DEA and LMDI	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 2430
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en15072430	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shogo Eguchi, Hirotsu Takayabu, Chen Lin	4. 巻 138
2. 論文標題 Sources of inefficient power generation by coal-fired thermal power plants in China: A metafrontier DEA decomposition approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Renewable and Sustainable Energy Reviews	6. 最初と最後の頁 110562
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rser.2020.110562	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1．発表者名 中本 裕哉、江口 昌伍
2．発表標題 不確実性を考慮した太陽光発電所の発電効率性分析
3．学会等名 環境経済・政策学会2021年大会
4．発表年 2021年

1．発表者名 中本 裕哉、江口 昌伍、高藪 広隆
2．発表標題 変動性再生可能エネルギー発電所の発電効率性評価
3．学会等名 第17回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2022年

1．発表者名 緒方鞠、高藪広隆、江口昌伍、加河茂美
2．発表標題 廃食油を原料としたバイオディーゼル製造プラントの効率性分析
3．学会等名 環境経済・政策学会2020年大会
4．発表年 2020年

1．発表者名 江口昌伍
2．発表標題 メタフロンティアDEA分析を用いた中国における石炭火力発電の効率性分析
3．学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 常設研究部会 評価のOR研究部会 第89回研究会
4．発表年 2021年

1．発表者名 江口昌伍
2．発表標題 地域間格差と発電所の規模の違いを考慮した中国における石炭火力発電所のCO2削減ポテンシャルの推計
3．学会等名 第16回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2021年

1．発表者名 緒方鞠、高藪広隆、江口昌伍、加河茂美
2．発表標題 日本のBDF製造プラントの生産効率性評価
3．学会等名 第16回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2021年

1．発表者名 江口昌伍
2．発表標題 地域間格差を考慮した中国における石炭火力発電効率性の動態分析
3．学会等名 環境経済・政策学会2019年大会
4．発表年 2019年

1．発表者名 江口昌伍
2．発表標題 中国における石炭火力発電効率性の地域間格差とその要因
3．学会等名 第15回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2020年

1．発表者名 江口昌伍、高藪広隆
2．発表標題 メタフロンティアDEA分析を用いた中国における石炭火力発電の効率性分析
3．学会等名 日本OR学会2020年春季研究発表会
4．発表年 2020年

1．発表者名 Shogo Eguchi, Yuya Nakamoto, Hirotaka Takayabu
2．発表標題 Dynamics and regional heterogeneity in power generation efficiency of PV power plants in Japan focusing on new market entrants
3．学会等名 28th International Input-Output Association Conference (国際学会)
4．発表年 2022年

1．発表者名 中本裕哉、江口昌伍、高藪広隆
2．発表標題 気象条件の不確実性を考慮した太陽光発電所の発電効率性分析
3．学会等名 環境経済・政策学会2022年大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 Shogo Eguchi, Yuya Nakamoto, Hirotaka Takayabu
2．発表標題 Investigating power generation efficiency of PV power plants in Japan focusing on new market entrants
3．学会等名 The 15th Biennial International Conference on EcoBalance (国際学会)
4．発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------